



University of Groningen

Collective nuclear flow and shadowing by spectator matter

Raschke, Ansgar Egon

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1998

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Raschke, A. E. (1998). Collective nuclear flow and shadowing by spectator matter. Groningen: s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting

Onderzoek naar de toestandsvormen van de materie

Met behulp van botsingen van zware atoomkernen wordt onderzoek gedaan naar extreme toestandsvormen van materie. In dit proefschrift wordt het gedrag van verhitte en samengedrukte kernmaterie bestudeerd. Dit wordt gedaan door eigenschappen van de deeltjes te bepalen die uit het botsingscentrum worden geëmiteerd. De mate waarin de koude kernmaterie buiten het botsingscentrum deze eigenschappen beïnvloedt wordt onderzocht.

Het onderzoek naar buitengewone materietoestanden vindt zijn oorsprong in de astrofysica. In het heelal zijn objecten waargenomen met eigenschappen die op aarde niet kunnen bestaan. In neutronensterren bijvoorbeeld heerst een extreme dichtheid van materie. De vraag is dan hoe deze materieformaties in hun bijzondere toestanden stabiel kunnen zijn. Bij het kosmologische “Big Bang” model wordt er van uitgegaan dat alle materie zich oorspronkelijk in een zeer hete toestand met extreem hoge dichtheid bevond. Na deze oerknal ontstond alle huidige materie door expansie en afkoeling.

Bij deze daling van dichtheid en temperatuur vonden faseovergangen plaats net zoals bij macroscopische materietoestanden, bijvoorbeeld de verandering van vloeibaar water in ijs. Een belangrijke overgang tussen toestandsvormen heeft volgens modelberekeningen zo’n $20 \cdot 10^{-6}$ seconden na de oerknal plaatsgevonden. Daarbij veranderde het Quark-Gluon Plasma in materie die uit protonen en neutronen bestaat. Dit proces vond plaats bij temperaturen van rond de 10^{13} K (ongeveer 1 GeV). Drie minuten na de oerknal vormden zich lichte kernen uit protonen en neutronen. Hierbij heersten temperaturen van rond de 10^{10} K (enkele MeV).

Het toestandsdiagram van kern- en hadronische materie, de “Equation of State” (EOS), beschrijft hoe materie zich gedraagt afhankelijk van temperatuur en dichtheid (zie ook figuur 1.1 op pagina 10). De compressibiliteit van kernmaterie bepaalt het verloop van de EOS. Het enige punt dat thans echter precies bekend is, is de grondtoestand van een kern: druk en temperatuur zijn nul en de dichtheid is $3 \cdot 10^{14}$ g/cm³.

De voorspellingen van kernmateriemonellen kunnen met kern-kern-botsingen bij relativistische energieën worden onderzocht. Bij dit soort botsingen van zware atoomkernen wordt een zeer kleine hoeveelheid kernmaterie samengeperst en ver-

hit. De temperatuur die bereikt kan worden is gerelateerd aan de bewegings-energie die versnellers aan de nucleonen in de betrokken kernen meegeven. De temperatuur waarbij bijvoorbeeld protonen en neutronen loskomen uit het kernverband, 10^{10} K, komt overeen met een excitatie-energie van enkele MeV/nucleon. Met relativistische zware-ionen botsingen wordt geprobeerd de gegevens van het toestandsdiagram van kern- en hadronische materie te bestuderen.

Op versnellerinstituten bij Genève en in Brookhaven worden experimenten uitgevoerd die tot doel hebben de faseovergang van kernmaterie bestaande uit protonen en neutronen naar het Quark-Gluon Plasma te bestuderen. Aan het verhittingsproces, dat aan deze overgang vooraf gaat, wordt op het kernfysisch instituut GSI in Darmstadt onderzoek gedaan. Hierbij worden kernen tot op 88% van de lichtsnelheid versneld en op een trefplaat geschoten. Daarbij wordt eerst een toestand met hoge dichtheid en temperatuur bereikt. Daarna koelt de kernmaterie weer af en expandeert. In deze botsingen wordt kernmaterie tot op twee à drie keer de normale dichtheid samengeperst. Bij de bestudeerde energieën worden in nucleon-nucleon wisselwerkingen ook veel mesonen geproduceerd. Daarom wordt deze toestandsvorm hadronische materie genoemd.

Collectief gedrag van nucleonen

In dit proefschrift wordt een symmetrisch reactiesysteem bestudeerd, d.w.z. er worden kernen van dezelfde grootte als projectiel en target gebruikt. Bij een centrale botsing doen alle kernbouwstenen van de twee kernen mee aan de reactie. Bij scherende botsingen met een gedeeltelijke overlap tussen de kernen moet er onderscheid gemaakt worden tussen nucleonen in het overlapgebied, de zogenaamde “participants” of “deelnemers”, en de overigen nucleonen, de zogenaamde “spectators” of “toeschouwers”. Dit is ten gevolge van het feit dat de relatieve snelheid van de botsende kernen onderling groter is dan de karakteristieke snelheid, de Fermi-snelheid (30% van de lichtsnelheid), van de nucleonen in de kernen. Dat houdt in dat de groepen nucleonen, “participants” en “spectators”, in een zekere zin van elkaar losgekoppeld zijn.

Uit een eerste reeks experimenten met relativistische zware-ionen botsingen zijn resultaten voortgekomen die op een collectief gedrag van de uitgezonden nucleonen duiden. Zulk gedrag wordt gekarakteriseerd door een gezamenlijke snelheid en een bepaalde voorkeursrichting van de betrokken kernbouwstenen.

Volgens voorspellingen van modelberekeningen wordt de materie in het centrum van een botsing sterk samengeperst. Hoge druk en toenemende dichtheden zijn het gevolg. Door de afstotende kernkrachten wordt dan een deel van deze kernmaterie radiaal rond de botsingsrichting uitgezonden.

Afhankelijk van het feit of een botsing centraal of scherend is, zijn er verschillende drukgradiënten van toepassing. Aangezien de deeltjes bij voorkeur in de richting van de minste druk ontsnappen vindt een collectieve emissie van kernbouwstenen in voorkeursrichtingen plaats.

De opbrengst van “participants” loodrecht op het reactievlak is maximaal bij bijna centrale botsingen en bij deeltjessnelheden rond de snelheid van het zwaartepuntsstelsel. Dit effect heet “squeeze-out” of wel “uitpersing”. Botsingen waarin de kernen gedeeltelijk overlappen, leiden tot een zijwaartse stroom van deeltjes in het reactievlak, “baryon flow”.

Zijn “participants” en “spectators” ontkoppeld?

Bij 1 GeV/nucleon botsingen van goudkernen zijn pionverdelingen bij deeltjessnelheden rond de snelheid van het zwaartepuntsstelsel geanalyseerd. In deze experimenten werd de opbrengst van pionen als functie van de azimutale hoek relatief ten opzichte van het reactievlak gemeten. Het resultaat was dat de pionverdelingen op de vorm van verdelingen voor “squeeze-out” van baryonen leken. Dit fenomeen werd daarom “meson squeeze-out” genoemd.

Met modelberekeningen is echter aangetoond dat de “meson squeeze-out” wordt veroorzaakt door verstrooiing en absorptie van de mesonen in het reactievlak aan “spectator”-materie. Deze invloed van “spectator”-materie op deeltjes vanuit het “participant”-gebied kan betekenen dat “participants” en “spectators” bij relativistische zware-ionen reacties nog steeds niet ontkoppeld zijn.

De meetinstrumenten voor de studie van “participants” en “spectators”

In de experimenten beschreven in dit proefschrift werd nader onderzocht in hoeverre er sprake is van “participant-spectator”-koppeling in kernmaterietoestanden bereikt in relativistische zware-ionen reacties.

Op het GSI werden goudkernen met een energie van 1 GeV/nucleon op een trefplaat van goud geschoten. Bij deze energie worden ook mesonen geproduceerd. Neutrale pionen, η mesonen en baryonen werden gedetecteerd. De analyse van de opbrengst en de energieverdeling van pionen geeft informatie over aangeslagen nucleonen, de Δ 's. Dit onderzoek geeft daarom ook informatie over de formatie van hadronische materie.

Met de Two-Arm Photon Spectrometer (TAPS) werden zowel de pion- als ook de baryonverdelingen gemeten. De TAPS-detector werd gecombineerd met de Outer-Plastic-Wall detector (OPW). Met deze detector is het mogelijk het reactievlak te reconstrueren dat door de richting van de projectiel participants wordt bepaald. Door de reconstructie van het reactievlak en de meting van de deeltjesverdelingen met twee aparte detector systemen te doen wordt gewaarborgd dat de resultaten niet door autocorrelaties worden beïnvloed.

Een observabele voor koppeling tussen “participants” en “spectators”

Voor de doelstelling van deze studie is het noodzakelijk een gevoelige observabele voor een mogelijke wisselwerking tussen “participant” en “spectator” materie ter

beschikking te hebben. Hiervoor worden verdelingen van de bewegingsenergie van deeltjes geanalyseerd voor verschillende azimuthale hoeken van deze deeltjes met het reactievlak. Energieverdelingen in het reactievlak en loodrecht op het reactievlak worden met elkaar vergeleken, hetgeen energieratios oplevert, een observabele die bruikbaar blijkt te zijn.

Voordat van deze energieratio-observabele bij dit onderzoek gebruik wordt gemaakt, wordt er eerst nog naar de informatiewaarde van alleen de azimuthale hoekverdelingen gekeken. De volledige azimuthale verdelingen zijn in dit proefschrift voor de waterstof- en de heliumisotopen bestudeerd. Deze verdelingen tonen een azimuthale asymmetrie die overeenkomt met het bekende “flow”-effect. Uit de mate van asymmetrie wordt een “flow”-sterkteparameter afgeleid. Ook de typische “squeeze-out”-verdeling is waargenomen. Het zou interessant zijn ook een sterkteparameter voor “squeeze-out” te bepalen. Helaas is de statistiek van gemeten data voor een dergelijke selectieve analyse niet afdoende.

De energie- en de azimuthale verdelingen worden nu in combinatie bekeken. De energieverdelingen in het reactievlak, in richting van de “flow”, en loodrecht op het reactievlak lijken op elkaar: de vorm van de energieverdelingen komt overeen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat voor de richting loodrecht op het reactievlak maar weinig hinder door “spectator”-materie te verwachten is.

De energieratio-observabele in het reactievlak, de energieverdeling in richting van de “flow” vergeleken met die in de tegenovergestelde richting, gedraagt zich anders. Hier toont de energieratio-observabele een positieve helling, d.w.z. er wordt een schijnbaar hogere temperatuur gevonden voor deeltjes in de “flow”-richting. De helling van energieverdelingen is gerelateerd aan de thermische toestand van de materie. Bij de ratio in het reactievlak is het mogelijke verschil in de mate van hindering door “spectator”-materie het grootst. In de “flow”-richting zijn de “participants” door de “spectators” afgeschermd. In de tegenovergestelde richting is helemaal geen afscherming te verwachten. Of dit werkelijk de goede verklaring voor de schijnbaar hogere temperatuur is moet door vergelijkingen met modelberekeningen worden aangetoond.

De invloed van “spectators” op “participants”

Er wordt gebruik gemaakt van drie modelberekeningen. Het eerste model kan alleen maar het collectief gedrag van de deeltjes nabootsen en heeft als doel om een globale beschrijving te geven als “spectators” en “participants” ontkoppeld zouden zijn. Het “Perpendicular Emitting Thermal Source” model levert een goede beschrijving van de deeltjes-“flow” binnen het reactievlak. In dit model wordt van een radiale emissie uitgegaan. Daar bovenop wordt de emissie in de “flow”-richting versterkt.

Een tweede model is nodig om de “spectators” te kunnen beschrijven. Hiervoor is in dit proefschrift van het “Dubna Cascade Model” gebruik gemaakt. Dit model maakt onderscheid tussen “participants” en target- en projectiel-“specta-

tors” door verschillende “deeltjesgassen” te gebruiken. In het “Dubna Cascade Model” zijn de deeltjes gebonden door een statisch gemiddeld veld, “mean-field”. Met de compressibiliteit wordt dus geen rekening gehouden.

Het derde model, “Isospin Quantum Molecular Dynamics”, is het meest compleet en bevat beide aspecten, “flow” en “spectators”. “Flow” komt hier tot stand doordat in dit model wel rekening wordt gehouden met de afstotende kernkrachten in een dynamisch gemiddeld veld.

De experimentele azimutale verdelingen zijn vergeleken met berekeningen met het “Perpendicular Emitting Thermal Source” model. Model- en experimentele resultaten komen goed overeen. Hiermee wordt de aanwezigheid van deeltjes-“flow” bevestigd. Kleine afwijkingen tussen experiment- en modelverdelingen worden hierna aan de hand van de energieratio-observabele bediscussieerd.

Het “Perpendicular Emitting Thermal Source” model is bij de interpretatie van “flow” in azimutale verdelingen nog redelijk succesvol. Maar het faalt bij de vergelijkingen met de energieratio-observabele. De conclusie is dat de gevonden schijnbaar hogere temperatuur bij de vergelijking in het reactievlak niet alleen te wijten is aan “flow”-verschijnselen.

Dezelfde gemeten resultaten vergeleken met “Dubna Cascade Model”-berekeningen tonen een betere overeenkomst in de tendens. Wel wordt er een groot verschil in opbrengst tussen model en meting waargenomen. De conclusie is hier dat niet alléén “spectator”-afhankelijkheden het schijnbare temperatuurgedrag veroorzaken.

De vergelijking tussen de meetresultaten en de berekeningen van het “Isospin Quantum Molecular Dynamics” model komen het best overeen. Zowel de tendens van de energieratio-verdelingen klopt als ook de opbrengst binnen de statistische fouten van het model. Vanwege het feit dat dit model zowel het “flow”-effect als ook “spectators” kan beschrijven is de interpretatie duidelijk: het gedrag van dit soort verdelingen wordt beïnvloed door “flow” én “spectators”. Er is echter niet voldoende statistiek in de berekeningen om de sterkte van deze invloed kwantitatief te bepalen. Maar toch komt hier duidelijk naar voren dat het resultaat van “participant-spectator”-koppeling door de berekening bevestigd wordt, door dezelfde tendens in de verdeling te tonen.

De “flow” van nucleonen (dat heeft betrekking op de “participant” zone) wordt gereduceerd door de invloed van “spectator”-materie. Deze schijnbare vermindering van deeltjes moet geïnterpreteerd worden als absorptie en verstrooiing van “participant”-deeltjes aan “spectator”-materie. Vanwege de schijnbare vermindering van deeltjes is de betere uitdrukking voor dit soort fenomeen: “shadowing”. Ten opzichte van de meting wordt de “participant”-materie door de “spectator”-materie geschaduwd. Als gevolg wordt in de metingen een schijnbaar hogere temperatuur in de “flow”-richting gevonden. Dit is geldig voor het snelheidsbereik van de “spectators”, die hun oorspronkelijke snelheid, niet beïnvloed door de reactie, aanhouden.

Een interessant vervolg van dit onderzoek zal zijn om door middel van betere

statistiek in de modelberekeningen door vergelijking met de meetresultaten de sterkte van de invloed van “spectator”-materie op de “participants” te quantificeren. De gevonden resultaten van de “participant-spectator”-koppeling zullen stimulerend zijn voor toekomstige modelontwikkelingen. Het zal interessant zijn deze invloed van “spectators” beter te leren kennen door middel van een studie van absorptie en verstrooiing die gepaard gaan met de “participant-spectator”-koppeling.

De resultaten van dit proefschrift laten duidelijk zien dat bij de interpretatie van data van relativistische zware-ionen botsingen rekening moet worden gehouden met het feit dat de “spectator”-materie de “participants” beïnvloedt als het om “spectator”-snelheden gaat. Tests van de reactiedynamiek kunnen alleen maar onder deze voorwaarde geïnterpreteerd worden. Correcties voor de nucleon-nucleon wisselwerking zijn hier noodzakelijk. Bij deze metingen moet de “flow”-sterkte voor het “shadowing”-aandeel gecorrigeerd worden.

In dit proefschrift wordt de “participant-spectator”-koppeling kwalitatief onderzocht. Daarmee is duidelijk gemaakt dat voor deeltjes zoals pionen, die bij de reactie geproduceerd worden, secundaire wisselwerkingen met “spectator”-materie een niet te verwaarlozen rol spelen. Het pionenonderzoek was ooit begonnen om directe aanwijzingen vanuit de hete reactiezone te verkrijgen. Met het resultaat van dit proefschrift is het echter duidelijk geworden dat pionensignalen vanuit het reactiecentrum niet onafhankelijk van de reactiegeometrie kunnen worden geïnterpreteerd.

Nawoord

Dit proefschrift heeft alleen tot stand kunnen komen dankzij bijdragen van meerdere personen. Het experiment is uitgevoerd door een team van twee internationale samenwerkingsverbanden, *TAPS* en *FOPI*. Door drie werkgroepen op verschillende instituten is een grote hoeveelheid data gezamenlijk geanalyseerd. Bij de ontwikkeling van *TAPS* is het personeel van de werkplaatsen in Groningen, Gießen, Darmstadt en Münster intensief betrokken geweest. De detectoren zijn in Groningen, Gießen en Jülich getest. Het uiteindelijke experiment heeft plaatsgevonden bij SIS, de nieuwe versneller in Darmstadt. Voor de tests en het experiment was de ondersteuning van de operateurs en de diensten van de instituten onontbeerlijk.

Op de lijst van betrokkenen bij deze samenwerking staan inmiddels meer dan tweehonderdvijftig personen. Tot dusverre echter heb ik nog niemand bij naam genoemd. Daarom is dit het juiste moment om tegen iedereen, onafhankelijk van soort en omvang van zijn bijdrage tot dit proefschrift, te zeggen: bedankt voor jullie inbreng! Het onderzoek heeft ervan geprofiteerd! Ook heb ik er veel van geleerd en ervaring opgebouwd. Toch er kan geen dankwoord worden uitgesproken zonder namen van speciale mensen te noemen.

Eén persoon in het bijzonder, Norbert Brummund, heeft heel veel bijgedragen aan mijn plezier in dit onderzoek. Zijn inbreng begon al met de begeleiding van mijn Diplomarbeit in Münster. Hij is nauw betrokken geweest bij de ontwikkeling van de Charged-Particle Veto Detector en het experiment op het GSI, waar wij goudkernen op goudkernen hebben laten botsen. Jammer genoeg is hij na zijn promotie en het eerste jaar van mijn data-analyse van werkkring gewisseld. Inmiddels echter werken wij weer samen op het rekencentrum van T-Mobil. Die Fülle gemeinsamer Erlebnisse im Zuge dieser Arbeit läßt sich kaum aufzählen. Die Eröffnung des Beschleunigers SIS in Darmstadt mit den Herren Bundes- und Landesministern der Forschungs- und Bildungsressorts sowie einer großen Anzahl internationaler Gäste bleibt unter diesen Ereignissen wohl unvergessen. Nachdem wir bis in die frühen Morgenstunden an dem zur-Schau-gestellten Experimentaufbau gearbeitet hatten, hat Norbert nämlich die Eröffnung seenruhig verschlafen.

De mensen, die een lang stuk van de weg naar dit proefschrift met mij hebben meegemaakt, zijn heel belangrijk geweest. Lars Venema, Albert Boonstra, Henk Braak en Kees Molenaar hoorden bij de KVI-*TAPS*-OIO's en -studenten van het eerste uur. Met plezier denk ik aan de discussies met Albert over het "buigen van de lichtgeleiders". Veel van de analysetijd heb ik samen met Lars doorgebracht. Van hem kreeg ik veel nuttige programmeertips. Albert en Lars hebben deel uitgemaakt van het ex-

perimenteerteam op het GSI. Ook de inbreng van de Gießen-“OIO’s”: Olaf Schwalb, Frank-Dieter Berg en Matthias Pfeiffer is belangrijk geweest voor het experiment. Nicht nur beim Experiment waren die Hessen wichtig; die “Heimatkenntnis” war sicherlich auch beim Erkunden eines jeden Restaurants im Umkreis von zehn Kilometern um die GSI herum von wesentlichem Vorteil. I am grateful to the members of the *FOPI* collaboration. Especially Norbert Herrmann I would like to thank for his unremitting effort for the common experiment with both detectors *FOPI* and *TAPS*. I appreciate all the many tips of Thomas Wienold for the calibration of the *Forward Wall*.

Aan alle OIO’s van het KVI mijn dank voor de gezelligheid in samenhang met en buiten de natuurkunde om. Speciaal wil ik hier Sander Slegt, John van Pol, Marc-Jan van Goethem, Paul Vogt en Marieke Hoefman noemen, die allemaal in de Heavy-Ion Group “meestrijden” of hebben “meegestreden”. Die zeitweise “Verstärkung aus Berlin und Münster”, Martin Müller und Frank Poehlmann, war “besonders gesellig”.

Wolfgang Kühn, the master of the data acquisition, I would like to thank for developing and maintaining the computer facilities. In particular I appreciate the participation of the Prague-group in the development of particle-identification routines: thank you Michal Šumbera, Vladimir Wagner, Milos Pachr and Andrej Kugler.

De volgende mensen wil ik graag noemen vanwege hun bijzondere bijdrage aan de bouw van de *TAPS* detector: Imco Smid van de mechanische werkplaats van het KVI en de lijmtovenaar Ruud van der Ploeg; aus Gießen Walter Döring und Wolfgang Niebur und aus Münster Helmut Baumeister als den “Meister der Lichtfaser-Bearbeitung”.

Mijn promotor Herbert Löhner bedank ik voor de interessante vraagstelling, zijn inzet en onverstoorbare belangstelling voor alle details van dit onderzoek. Ook wil ik Hans Wilschut, mijn co-promoter, bedanken. Van zijn ervaring op het gebied van elektronica en modelvergelijkingen heb ik veel geleerd. I would like to express my gratitude to the reading committee, Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert (Karlsruhe), Prof. Dr. Muhsin Harakeh and Prof. Dr. Rolf Siemssen for a careful reading of this thesis and for the valuable comments and corrections. In deze samenhang bedank ik ook Reint Ostendorf voor het nauwkeurig doorlezen van het manuscript en Marcel Seip voor de correctie van de Nederlandstalige teksten. Benedict Wolf I would like to thank for his very helpful language comments to the english parts of this book.

Voor alle gezelligheid gedurende repetities, optredens en koorreisjes bedank ik alle leden van het JPG, met wie ik vijf jaren veelvuldig ben opgetrokken. Speciaal wil ik hier noemen: Erik Kruisman en Ronald Lukassen, Dirk ten Dam en Tineke van Elmpt, Arie Drenth en Dre Meijer. Ik heb van deze afwisseling genoten!

Mein Dank geht auch an meine “neuen” Kollegen und meinen “neuen” Arbeitgeber die T-Mobil. Ich bedanke mich bei Udo Mantey, Manfred Kunstlewe und Hermann Steinkamp besonders dafür, daß innerhalb des letzten Jahres sehr oft meine “Arbeits-einsätze” in Groningen erst durch ein flexibles Entgegenkommen bei der “Urlaubsplanung” ermöglicht wurden.

Ich danke meinen Eltern, daß sie mich meinen Weg haben gehen lassen. Allen Freunden danke ich, daß sie mich auf diesem Weg begleitet haben. Deine Unterstützung während der letzten Jahre war ein sehr wesentlicher Beitrag zu dieser Dissertations-schrift, liebe Marion, bedankt!

Groningen, december 1997 *Ansgar*